

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2025.03.001

引用格式: 刘三平, 王子豪, 郑朝振, 秦树辰, 苏立峰, 周起帆. 红土镍矿高压酸浸技术研究进展与展望[J]. 矿冶, 2025, 34(3): 355-362.

LIU Sanping, WANG Zihao, ZHENG Chaozhen, QIN Shuchen, SU Lifeng, ZHOU Qifan. Research progress and prospects of high-pressure acid leaching technology for laterite nickel ore[J]. Mining and Metallurgy, 2025, 34(3): 355-362.

红土镍矿高压酸浸技术研究进展与展望

刘三平 王子豪 郑朝振 秦树辰 苏立峰 周起帆

(矿冶科技集团有限公司, 北京 102600)

摘 要: 系统综述了高压酸浸(HPAL)技术在红土镍矿湿法冶金领域近 70 年的发展历程与技术演进, 剖析三代 HPAL 技术的工艺改进路径, 包括工艺参数提升以及沉淀工艺创新。现有技术仍面临三大核心挑战: 关键设备材料要求高、尾渣产生量大且含硫量高以及铁、铝等有色金属综合回收技术尚未成熟。矿冶集团提出的“两段加压浸出”新工艺, 通过高压酸浸—高压中和双段工艺, 实现了高铁褐铁矿与高镁蛇纹石矿协同处理, 工艺生产成本低, 资源利用率高。特别探讨了尾渣资源化利用的最新研究进展, 包括磁化焙烧—磁选、还原熔炼以及磷酸铁制备等技术路径。指出开发高效低成本的尾渣全组分利用技术将是实现 HPAL 工艺可持续发展的关键。未来 HPAL 技术将朝着工艺条件优化、设备可靠性提升和资源综合利用的方向发展, 为红土镍矿的绿色高效开发提供技术支撑。

关键词: 红土镍矿; 高压酸浸; 两段加压浸出; 尾渣利用

中图分类号: TF815 文献标志码: A 文章编号: 1005-7854(2025)03-0355-08

Research progress and prospects of high-pressure acid leaching technology for laterite nickel ore

LIU Sanping WANG Zihao ZHENG Chaozhen QIN Shuchen SU Lifeng ZHOU Qifan

(BGRIMM Technology Group, Beijing 102600, China)

Abstract: This paper systematically reviews the development and technological evolution of high-pressure acid leaching (HPAL) technology in the field of nickel laterite ore hydrometallurgy for nearly 70 years, and it analyses the process improvement paths of three generations of HPAL technology, including process parameter enhancement and precipitation process innovation. The existing technology still faces three core challenges: high material requirements for key equipment, large tailings generation with high sulphur content, and immature technology for comprehensive recovery of valuable metals such as iron and aluminium. The new process of "two-stage pressurised leaching" proposed by the BGRIMM Group achieves synergistic treatment of high-iron limonite and high-magnesium serpentine ore through a two-stage process of high-pressure acid leaching and high-pressure neutralisation, with low production cost and high resource utilisation rate. Furthermore, this paper especially discusses the latest research progress of tailings resource utilisation, including the technological paths of magnetisation roasting-magnetic separation, reduction smelting and iron phosphate preparation, etc. The development of highly efficient and low-cost whole-component utilisation technology of tailings will be the key to realising the sustainable development of the HPAL process. In the future, HPAL technology will develop towards optimisation of process conditions, improvement of equipment reliability and comprehensive utilisation of resources, providing technical support for the green and efficient development of nickel laterite ore.

收稿日期: 2024-08-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC2902502)

第一作者: 刘三平, 博士, 正高级工程师, 主要从事有色金属冶金新技术开发及技术成果转化等研究。E-mail: 370537373@qq.com

Key words: laterite nickel ore; high pressure acid leaching (HPAL); two-stage pressure leaching; utilisation of tailings

近年来,镍金属作为“低碳环保”“绿色经济”等战略新兴产业发展不可或缺的关键材料,在动力电池正极材料“高镍化”趋势的推动下,全球镍资源需求持续攀升^[1]。据嘉能可公司预测,2030年动力电池对镍的需求量将高达110万t。目前原生镍资源主要来源于硫化镍矿和红土镍矿,随着优质硫化镍矿资源日益枯竭,储量丰富、开采成本低的红土镍矿逐渐成为镍资源开发的重点^[2,3]。如何高效开发和提取红土镍矿,特别是低品位矿,对我国资源安全保障和新能源产业发展具有重要意义。

红土镍矿具有镍品位低、杂质含量高且镍又与其他矿物共生等特点,传统选矿方法难以有效富集,通常采用直接冶炼方式生产镍产品。主流工艺包括堆浸(HL)、常压浸出(AL)、高压酸浸(HPAL)和还原焙烧—氨浸法^[4]。其中,堆浸工艺反应速率慢、产率低^[5];常压浸出虽操作条件温和(50~90℃),但存在金属回收率低、酸耗高等问题^[6,7];还原焙烧—氨浸工艺是最早的红土镍矿湿法处理工艺,由于矿石中的镁不易还原浸出,适于处理镁含量高于10%的红土镍矿,其原理是将镍、钴氧化物还原焙烧为金属态,将大部分的铁氧化物还原为 Fe_3O_4 ,再通过氨浸,使金属镍、钴与氨形成络合物镍氨及钴氨,铁以氢氧化铁形式沉淀入渣,从而实现镍和钴的选择性浸出。浸出液经过净化、氨蒸等流程后生成氧化镍产品,但还原气氛难控制、使用药剂用量较多、工艺流程较复杂、能耗更高^[8]。相比之下,高压酸浸工艺镍钴回收率高、生产成本可控,正成为红土镍矿冶炼的主流技术^[9],多家企业如力勤资源、住友金属、华友钴业、青美邦等近年来均加大布局了红土镍矿HPAL处理工艺。

红土镍矿通过湿法冶金工艺获得的产品主要包括镍钴的混合氢氧化物沉淀(MHP)和镍钴的混合硫化物沉淀(MSP),这些中间产品可进一步加工成电镍或硫酸镍钴等电池原料。基于产品灵活性优势,以及新能源汽车产业快速发展的需求,高压酸浸工艺展现出显著的技术经济性。本文系统梳理了红土镍矿高压酸浸工艺的技术进展,并对其未来发展进行展望,以期对红土镍矿高效开发利用提供参考。

1 红土镍矿资源特点

红土镍矿是由热带雨林气候下的蛇纹石和橄榄

石经长期风化淋滤作用形成的次生氧化镍矿床。在风化过程中,铁氧化为三价铁使矿石呈现红色^[10]。这类矿床主要分布在赤道附近的印尼、菲律宾、古巴、澳大利亚等国家。

图1展示了典型的红土镍矿床化学组分割面分布特征。根据剖面组成,红土镍矿可分为三层^[11]:上层为褐铁矿型,铁含量高(>40%),硅、镁含量低(<10%),镍品位约1%,钴含量>0.1%,主要矿物为针铁矿和赤铁矿,次要矿物包括石英、锰氧化物和蒙脱石等,镍主要以类质同象形式取代铁;下层为硅镁镍矿型(蛇纹石型),硅、镁含量高(>25%),镍品位约2%,铁含量低(<20%),主要矿物为叶蛇纹石和蒙脱石,次要矿物包括绿泥石、滑石、二氧化硅及少量尖晶石和磁铁矿等,镍主要取代硅镁酸盐晶格中的镁;中间过渡层组分介于上下两层之间,硅、镁含量为5%~20%,镍含量1%~2%,主要矿物为绿脱石,次要矿物为二氧化硅和少量针铁矿,镍以类质同象和氧化物形式赋存于绿脱石、硬锰矿及铁氧化物中^[12]。高压酸浸工艺主要用于处理褐铁矿型红土镍矿^[13,14],且已实现了工业化应用。

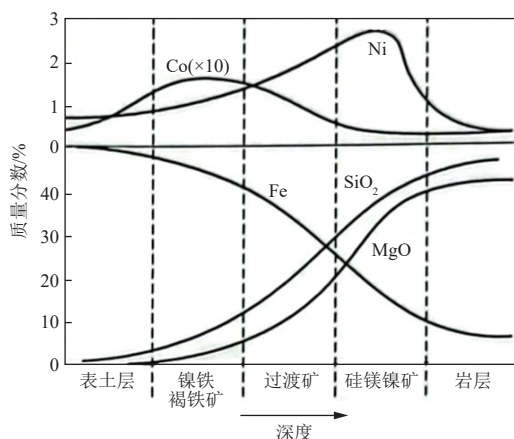


图1 红土镍矿化学组分变化剖面图^[11]

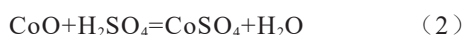
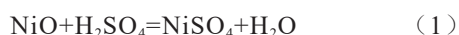
Fig. 1 Profile of chemical composition changes of laterite nickel ore^[11]

2 红土镍矿高压酸浸(HPAL)技术原理与基本流程

2.1 技术原理

高压酸浸过程是一个多相反应体系,红土镍矿中含镍、钴的主要矿物成分被完全解离,将镍、钴以离子

态释放, 其中发生的主要化学反应^[15]见式(1)–(5)。



红土镍矿中含量较高的杂质元素如Fe、Al、Mg等也会被一起浸出, 增加酸耗。但与常压浸出相比, 高压酸浸最重要的优点是: 在高温反应条件下, 浸出的大部分铁和铝分别以赤铁矿和明矾石的形式再沉淀, 释放当量的酸, 并且二价铁离子在一定条件下被氧化再水解, 这些过程极大地降低了整个反应体系的酸耗。同时, 矿物种的Fe、Al、Si入渣, Ni、Co、Mg入浸出液, 实现目标有价元素的选择性浸出。此外, 在更高的温度下, 更快的反应动力学缩短了矿浆反应停留时间(从常压酸浸的大约12 h缩短到0.5~1.5 h), 从而提高了生产率^[16,17]。

2.2 HPAL 工艺基本流程

图2为红土镍矿高压酸浸工艺原则流程图, 分为四部分, 包括原料准备、高压酸浸、中和及逆流(CCD)洗涤和产品生产。先对原矿进行选铬除铬处理后制成矿浆, 在高温高压下与硫酸反应后, 镍、钴浸出进入矿浆, 浸出率一般在95%以上^[18-20]。通过闪蒸降温后用浓密机逆流洗涤, 再将浸出液经除钙镁后得到高品位镍钴溶液, 随后通过硫化沉淀或中和沉淀得到镍、钴含量较高的中间产品。该中间品再溶解、纯化后可根据需要用于生产电解镍或硫酸镍, 可在不锈钢行业或新能源产业切换。

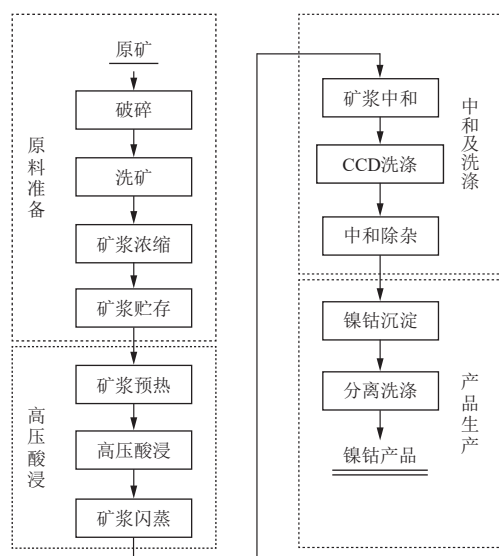


图2 HPAL原则工艺流程图

Fig. 2 HPAL principle process flow chart

HPAL的工艺难度较大, 主要体现在三大方面^[21,22]:

一是需要根据原矿的性质设计项目。例如镁是反应体系中主要耗酸成分, 矿石中的镁含量很大程度决定了浸出工艺的耗酸量, 一般要求配矿后的MgO含量低于5%, 才能确保工艺的经济性。矿石物理性质很大程度上影响了冶炼的稳定性和效益, 因此HPAL很难程序化地进行复制。二是设备要求高。由于采用高压高温环境, 核心设备需要使用特殊材料, 对整个工艺及设备操作、维护要求也较严格。三是需要对尾矿进行处理。利用HPAL处理的原矿品位通常较低, 生产1 t镍金属要产生150~200 t酸性矿渣, 尾矿产生量大, 处理难度高。此外, HPAL工艺生产过程中损耗较大, 建设周期长, 建厂成本也较高, 生产中容易发生管路腐蚀和结垢现象, 需对设备进行定期维护。

3 HPAL 工艺发展现状

3.1 工艺发展现状

HPAL技术在红土镍矿冶炼领域经历了三代技术更迭。第一代技术的代表是古巴MOA厂, 这是全球首个采用高压酸浸技术处理红土镍矿项目单位。它开创性地将多个帕丘卡立式反应釜进行串联来处理红土镍矿, 基本工艺流程为“HPAL—CCD洗涤—中和—MSP”, 利用H₂S沉淀镍钴, 获得硫化镍钴产品。浸出工艺的反应温度为246 °C, 压力为3.8 MPa。2007年起, 对项目进行二期扩建, 沿用原有技术, 扩建后总产能达3.2万t·a⁻¹镍金属量。该工艺路线短、镍钴回收率较高, 但设备易结垢, 影响运行效率。第二代以澳大利亚Bulong、Cawse及Murring厂为代表, 借鉴了黄金、锌冶炼等领域应用成熟的加压氧浸技术, 将立式无搅拌加压釜改为卧式多隔室搅拌加压釜, 增加了反应釜的有效容积, 产能大幅度提升。Murring厂采用“HPAL—CCD洗涤—溶液中和—MSP—氧压浸出—萃取—氢还原”工艺生产镍块、钴块^[23]。由于材料、设备选型不当, 配套设施未跟上主工艺, 导致实际生产远未达到预期目标。第三代技术进一步优化工艺条件, 反应温度提升至250~270 °C, 压力达4~5 MPa, 适用于低品位红土镍矿的硫酸浸出。以中冶瑞木项目为代表, 采用“加压浸出—矿浆洗涤—除铁铝—MHP产品—硫酸镍钴及三元前驱体”工艺路线^[24], 通过调整工艺参数、改进关键设备及优化控制系统, 提高了生产稳定性、运行效率及金属回收率。该体系反应温度为245~255 °C, 压力为

4.1~4.8 MPa, 反应时间缩短至45~60 min, 镍钴浸出率达95%^[18]。研究^[25]表明, 影响浸出效果的关键因素依次为: 温度>酸矿比>浸出时间>搅拌速度>矿浆浓度。2017年, 中冶瑞木项目成功实现达产并持

续超产, 为全球HPAL技术应用提供了重要参考。此后, 我国企业主导的HPAL项目纷纷落地。表1列出了我国2021年以来印尼红土镍矿主产地计划投产的部分项目情况。

表1 2021年以来印尼高压酸浸项目情况

Table 1 Status of high pressure acid leaching projects in Indonesia since 2021

项目	公司	位置	镍金属产量/t	钴金属产量/t	工艺产品
PT OBI	宁波力勤	奥比岛	一期37 000	4 500	MHP
			二期18 000	2 250	MHP和MSP
			三期65 000	7 500	MHP和MSP
华越	华友、洛钼等	Morowali	60 000	7 800	MHP
青美邦	格林美等	Morowali	50 000	4 000	MHP
华飞	华友、青山等	Weda Bay	120 000	15 000	MHP和MSP
BASF	Eramet和巴斯夫	Weda Bay	42 000	5 000	MHP
Pomalaa 项目	Vale和住友	Pomalaa	40 000	—	MSP

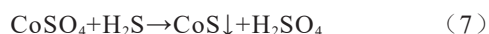
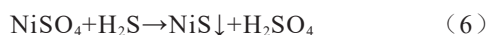
目前, 印尼落地的湿法冶炼项目主要采用第三代HPAL技术。经过高温高压硫酸浸出后, 各项目虽产品方案略有差异, 但主要产出硫化镍钴或氢氧化镍钴。近年来, 且逐渐趋向于生产后端较容易处理的氢氧化镍钴, 并逐步转向为新能源产业提供所需的硫酸镍钴原料。

3.2 镍钴沉淀

镍钴沉淀富集是红土镍矿高压酸浸工艺的关键环节, 通过对浸出液进行硫化沉淀或中和沉淀, 可获得镍钴富集的中间产品。该中间品经深度纯化处理后, 可根据实际需求生产电解镍或硫酸镍钴产品。目标产物的选择直接影响生产流程设计, 并对项目投资建设和运行具有重要影响。

3.2.1 硫化氢沉淀法

该工艺采用硫化氢、过硫化氢或硫化钠等硫化物作为沉淀剂, 通过pH值调节、浸出液净化、镍钴沉淀及液固分离等步骤, 最终获得镍钴硫化物产品。硫化剂优选硫化氢, 其突出优势在于硫化氢仅与Ni、Co发生选择性沉淀反应, 而不与Mn、Mg、Al、Si等杂质反应, 因而产品杂质含量较低^[26,27]。涉及的主要化学反应见式(6)~(7)。



工艺控制的关键参数为pH值(1.0~3.0)和反应温度(>80 ℃), 在此条件下反应2 h后, 镍钴沉淀率可达98%以上。但需注意, pH值和温度控制要求严格: 过低会降低反应速率, 过高则可能导致杂质共沉淀。典型案例包括: 古巴Moa项目(首个应用该工艺)、澳大利亚Murrin项目、菲律宾Taganito和Rio

Tuba项目。硫化氢沉淀镍钴工艺优点在于镍钴沉淀率高、产物杂质含量低、适合较低的pH环境, 但由于采用的硫化氢毒性强, 安全风险高、工艺设备复杂、投资成本高以及与HPAL主工艺适配度低这些问题限制了其发展应用, 亟待通过技术创新加以解决。

3.2.2 氧化镁沉淀法

氧化镁因其安全可靠、成本低廉的特性, 成为国外镍钴项目广泛采用的沉淀剂^[28,29]。该工艺最早由澳大利亚Cawse项目于1998年成功应用。其原理是通过氧化镁调节溶液酸度, 随着用量增加, 促使水解反应向沉淀方向进行, 使镍钴离子形成氢氧化物沉淀。该工艺的优势是: 可避免引入钠、钙等杂质, 沉淀镁可与原矿镁协同回收, 产品纯度高。由于氧化镁活性直接影响沉淀效果, 高活性氧化镁成本较高、储存运输过程中易失活失效, 成为制约该工艺应用的最大因素。

3.2.3 氢氧化钠沉淀法

该工艺通过氢氧化钠与硫酸镍钴反应生成氢氧化物沉淀, 主要反应见式(8)~(9)。

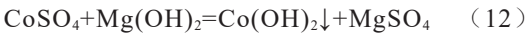


浸出液除铁铝后加入氢氧化钠, 控制体系反应温度和pH值, 将镍钴以沉淀方式富集。该工艺过程操作简单、反应快速、过程安全稳定, 但产出的MHP颗粒细小、沉降性能差, 且氢氧化钠消耗量大、底流浓度低、洗涤时间长、滤饼含水量高, 严重制约该生产工艺的应用, 目前国际上鲜有企业采用该工艺进行工业化生产。

3.2.4 氢氧化钠转碱转晶种沉淀法

针对镍钴氢氧化物富集沉淀工艺的核心问题^[30],

关键在于控制沉淀结晶颗粒的生长速率，避免反应体系过度饱和，同时调控OH⁻的生成速度。由于氢氧化钠反应过快，难以有效控制沉淀颗粒的生成过程。研究发现，Mg(OH)₂因其较低的溶解度特性，且原矿本身含有镁(镁沉淀pH值高于镍钴沉淀pH值)，可在除杂过程中保持溶解状态。通过向浸出液中加入氢氧化钠并控制pH值，使镁离子与氢氧根反应生成氢氧化镁，从而实现从直接利用NaOH沉淀向利用体系内Mg(OH)₂沉淀的转化。主要反应见式(10)–(12)。



该转碱工艺通过以下机制实现优化：精确控制溶液中OH⁻的释放速率，降低镍钴在浸出液中的过饱和度和，促进沉淀颗粒的快速生长和粒径增大。同时，

碱式硫酸镁等物质覆盖晶种生长面，产生表面活化效应，显著提升氢氧化镍钴沉淀效果。该工艺已在中冶瑞木项目成功实现工业化应用，不仅提高了项目达产率和经济效益，更在力勤OBI、华越等项目中得到推广，HPAL工艺持续优化并赢得市场认可。

表2对HPAL工艺中镍钴沉淀富集的四种主要工艺进行了对比分析，包括硫化氢沉淀法、氧化镁沉淀法、直接氢氧化钠沉淀法以及氢氧化钠转碱转晶种沉淀法。这些工艺各具特点，最终可分别获得镍钴硫化物和氢氧化镍钴两种中间产品。其中，镍钴硫化物产品仅适用于通过电解工艺生产电解镍和电解钴，而氢氧化镍钴产品经酸溶、除杂和萃取后可直接制备硫酸镍钴产品。后者具有工艺流程短、生产成本低等优势，同时与当前动力锂电池行业的原料需求高度契合，因此产物为氢氧化镍钴的工艺已成为行业普遍采用的主流工艺路线。

表2 高压酸浸沉淀工艺技术对比

Table 2 Comparison of high pressure acid leaching precipitation process technologies

沉淀工艺	产品指标		项目指标		优点	缺点	环境危害	回收率/%
	含水率	镍含量	整体作业率	项目达产率				
H ₂ S沉淀	<25	>50	—	80	回收率高，产品纯度高	配套设备多，投资大，运营风险高	废水、废渣	94~98
MgO沉淀	约50	40~50	90	80	安全性高，回收率高	MgO消耗大易失活，影响产品质量	废水、废渣	94~98
直接NaOH沉淀	>70	<35	—	35	工艺简单，安全性高	有价金属流失严重，回收率低	废水、废渣	约70
NaOH转碱转晶种沉淀	<50	>40	>92	110	回收率高，生产效率高，产品质量好	氢氧化钠沉淀剂成本较高	废水、废渣	约90

3.3 HPAL两段加压浸出新工艺

高压酸浸工艺在低镁褐铁矿的大规模工业生产中展现出显著优势，包括镍回收率高、钴可综合回收以及酸碱消耗量小等特点，使其成为当前及未来处理低镁褐铁矿的主流工艺。目前行业已发展出将含镁较高的蛇纹石型红土镍矿用于HPAL矿浆中和的“高压酸浸—常压中和”联合工艺。该工艺首先在高温高酸条件下实现镍钴的选择性浸出(浸出率>95%)，使大部分铁铝杂质留存于渣中。高压酸浸矿浆经三级闪蒸降温后，加入蛇纹石矿浆中和褐铁矿矿浆中的残酸，同时可浸出蛇纹石中40%~60%的镍。该联合工艺虽能提高红土镍矿资源利用率并减少后续中和剂用量，但仍存在明显缺陷：三级闪蒸预热系统的余热利用率较低，造成能源浪费；常压中和条件下无法使浸出的铁以赤铁矿形式沉淀释放酸，导致镍浸出率仅维持在50%~60%；常压中和难以有效除铝，增加了后续中和除杂工序的碱耗。

针对这些问题，矿冶科技集团创新性地提出了“两段加压浸出”优化工艺^[31]。该工艺采用高压高酸处理褐铁矿后，矿浆不经闪蒸直接通过管道进入高压中和段，与蛇纹石矿浆协同进行高压中和。利用褐铁矿高压酸浸余热在稍低温和压力条件下，既中和残留硫酸又使新生成的铁以赤铁矿形式沉淀释放酸，使二段镍浸出率提升至97%以上。与传统工艺相比，该工艺取消闪蒸步骤并梯级利用余热，显著提高了镍浸出率，减少了中和剂的消耗，且溶液铁含量有效降低(<1.0 g·L⁻¹)，实现了除铁和强化蛇纹石浸出的双重目标，且加压中和可有效沉淀铝，大幅减少后续处理负荷，在保持HPAL工艺优势的基础上，通过反应条件优化实现了生产成本降低和资源利用率提升，并能适配高铁、高镁混合矿种，并且经工业化验证，所产镍钴富集物可直接用于电池材料精炼，为新能源汽车产业链提供了高效、低碳的冶金解决方案，正在积极进行推广应用。

4 尾渣综合利用

国内外对红土镍矿的处理主要聚焦于镍、钴元素的提取,对铁、锰、镁等其他金属元素的回收利用关注较少。由于红土镍矿中镍、钴含量较低(一般总含量低于5%),经过高压酸浸提取后产生大量尾渣固废,生产1 t金属产品产生的矿渣高达200 t^[32]。这些渣中含有铁、镁、铝等元素,同时还含有约5%的硫,极具回收价值^[33]。目前针对红土镍矿高压酸浸渣主要以直接处理为主,包括尾矿坝堆积、地下压滤回填、深海填埋等方式。修建尾矿坝工艺简单、成本低,但占地面积广、垮坝风险较大;地下压滤填埋则技术要求高、投资大、维护周期长;由于大部分红土镍矿都集中在东南亚等岛国,对尾渣进行深海填埋是最经济的方式,但该技术是否会影响海洋生态仍存在大量争议,以致于许多项目尾矿深海填埋无法得到当地政府批准。随着环保要求不断提高,且实现资源循环利用发展的前提下,对红土镍矿高压酸浸尾渣进行无害化处置,回收其中有价成分,实现尾渣的综合利用是必由之路。

对红土镍矿高压酸浸尾渣中有价金属回收的研究已有一些研究人员进行了尝试,尤其对于含铁高的褐铁型红土镍矿,经高压酸浸后高达40%以上的铁以赤铁矿的形式进入渣,从尾渣中回收铁可以在一定程度上缓解我国铁资源的紧张局势,但尾渣中硫含量过高成为了制约炼铁的主要因素,主要有磁化焙烧—磁选、还原熔炼、碳化法等方法^[34,35]。研究最多的方法是还原—磁选工艺,在尾渣中加入还原剂,将赤铁矿还原为铁单体或磁铁矿。然后采用磁选工艺获得高铁低硫产品^[36]作为铁精矿使用,焙烧过程可将硫从渣中脱除制备硫酸,实现尾渣的提铁降硫。通过磁化焙烧—磁选工艺尾渣中铁回收率大于85%,但焙烧温度通常为800℃左右,且工艺复杂。WU等^[37]通过粒径筛分直接将渣中的硫含量降低了3%左右,随后通过碳酸钠浸出使渣中硫含量从5.12%降低到0.81%,同时铁含量从47.12%富集到55.27%,使得尾渣中的硫含量低于炼铁工业要求,能直接作为低品位铁矿石。还原熔炼则是将尾渣直接作为炼铁原料进行熔炼,在1 500℃以上熔炼实现铁回收率大于95%^[38],同时熔炼渣可作为一般固废堆存或者用于建材行业,但由于尾渣相较于铁矿石铁含量低且含有硫元素,影响生产能效,增加了脱硫成本。TANG等^[39]利用尾渣制备炼铁高炉炉料,通过合理的控制压型

工艺参数,实现尾渣的无黏结造粒,获得了铁品位为59.27%的球团,同时造球过程的高温焙烧使渣中脱除率达96%,达到了高炉炉料炼铁的工业要求。随着新能源产业的蓬勃发展,磷酸铁以其多变的晶体结构和广泛的用途受到了关注,CAO等^[40]利用磷酸对红土镍矿硝酸浸出渣实现了选择性提铁,通过控制反应过程的温度和pH值分步沉淀获得了纯度高于94%的磷酸铁,实现了尾渣与新能源产业的衔接。QIAO等^[41]则通过磷酸和铁粉实现了对红土矿高压酸浸渣中铁的还原浸出,并进行了放大实验,铁浸出率高达96.5%,获得了纯度为99.4%的磷酸铁,实现了尾渣的高附加值利用,减少了尾渣排放。但目前由于尾渣中的高含硫量仍是制约酸浸尾渣综合利用的主要因素,尚不能对大宗尾渣的中间体进行有效消纳,尤其是实现全组分综合利用。

5 结论与展望

自20世纪50年代发展至今,红土镍矿高压酸浸(HPAL)技术已日趋成熟。该工艺在处理低镁褐铁矿的大规模工业生产中展现出镍回收率高、钴可综合回收、酸碱消耗量小和产品方案灵活的显著优势。随着配套设备的持续改进和工艺技术的不断完善,HPAL在红土镍矿提镍领域的技术优势日益凸显,预计在未来相当长时期内仍将是低镁褐铁矿处理的主流工艺。

然而,HPAL工艺应关键设备性能限制、尾渣治理难度大、配矿等工艺条件优化需求方面仍面临若干技术挑战。其中,如何实现尾渣中铁等多种有价金属的综合利用,进一步提升HPAL工艺的社会经济价值,将成为镍冶炼行业未来发展的重点方向。这一突破将推动HPAL技术向更高效、更环保的方向持续发展。

参考文献

- [1] 金赐安,马保中,曹志河,等.红土镍矿硝酸加压浸出渣制备电池级磷酸铁[J].矿冶,2024,33(2):284-292.
JIN C A, MA B Z, CAO Z H, et al. Preparation of battery-grade iron phosphate from nitric acid pressure leaching residue of nickel laterite ore[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(2): 284-292.
- [2] PICKLES C A, ANTHONY W. Thermodynamic modelling of the reduction of a saprolitic laterite ore by methane[J]. Minerals Engineering, 2018, 120: 47-59.
- [3] PICKLES C A, FORSTER J, ELLIOTT R. Thermodynamic

- analysis of the carbothermic reduction roasting of a nickeliferous limonitic laterite ore[J]. *Minerals Engineering*, 2014, 65: 33-40.
- [4] STOPIĆ S R, FRIEDRICH B G. Hydrometallurgical processing of nickel lateritic ores[J]. *Vojnotehnicki glasnik/Military Technical Courier*, 2016, 64(4): 1033-1047.
- [5] KURSUNOGLU S, ICHLAS Z T, KAYA M. Leaching method selection for Caldag lateritic nickel ore by the analytic hierarchy process (AHP)[J]. *Hydrometallurgy*, 2017, 171: 179-184.
- [6] HOSSEINI NASAB M, NOAPARAST M, ABDOLLAHI H. Selective precipitation of iron from multi-element PLS produced by atmospheric leaching of Ni-Co bearing laterite[J]. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 2022, 56(4): 309-313.
- [7] GULTOM T, SIANIPAR A. High pressure acid leaching: a newly introduced technology in Indonesia[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2020, 413(1): 012015.
- [8] ILYAS S, SRIVASTAVA R R, KIM H, et al. Extraction of nickel and cobalt from a laterite ore using the carbothermic reduction roasting-ammoniacal leaching process[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, 232: 115971.
- [9] 吴文卫, 杜云鹏, 吴咪娜, 等. 从红土镍矿湿法废水中回收镁和锰[J]. *矿冶*, 2024, 33(1): 96-102.
- WU W W, DU Y P, WU M N, et al. Recovery of Mn and Mg from wet wastewater of laterite nickel ore[J]. *Mining and Metallurgy*, 2024, 33(1): 96-102.
- [10] 石文堂. 低品位镍红土矿硫酸浸出及浸出渣综合利用理论及工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- SHI W T. Fundamental and technological study on sulfuric acid leaching of low-grade nickel laterite and comprehensive utilization of leaching residue[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [11] 潘建, 田宏宇, 朱德庆, 等. 镍矿资源供需分析及红土镍矿开发利用现状[C]//亚洲与太平洋地区红土镍矿合作组织(APOL). 2019年镍产业发展高峰论坛暨APOL年会会刊. 南京: 2019.
- PAN J, TIAN H Y, ZHU D Q, et al. Study on development and utilization status of laterite nickel ore and supply & demand analysis of nickel resource[C]//APOL, Nickel Industry Chain Summit & APOL Annual Conference. Nanjing: 2019.
- [12] 常龙娇, 伞欣悦, 梁栋, 等. 红土镍矿冶金技术研究现状[J]. *矿冶*, 2020, 29(5): 63-68.
- CHANG L J, SAN X Y, LIANG D, et al. Research status of laterite nickel ore metallurgy technology[J]. *Mining and Metallurgy*, 2020, 29(5): 63-68.
- [13] 邢姜, 冷红光, 韩百岁, 等. 红土镍矿湿法冶金工艺现状及研究进展[J]. *有色矿冶*, 2021, 37(5): 7-12.
- XING J, LENG H G, HAN B S, et al. Metallurgical technology situation and research progress of laterite nickel ore[J]. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 2021, 37(5): 7-12.
- [14] 武兵强, 齐渊洪, 周和敏, 等. 红土镍矿湿法冶金工艺现状及前景分析[J]. *中国冶金*, 2019, 29(11): 5-10.
- WU B Q, QI Y H, ZHOU H M, et al. Status and prospect analysis of hydrometallurgical processes of laterite nickel ore[J]. *China Metallurgy*, 2019, 29(11): 5-10.
- [15] GUO X, SHI W, DONG L I, et al. Leaching behavior of metals from limonitic laterite ore by high pressure acid leaching[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(1): 191-195.
- [16] JOHNSON J A, MCDONALD R G, MUIR D M, et al. Pressure acid leaching of arid-region nickel laterite ore: Part IV: Effect of acid loading and additives with nontronite ores[J]. *Hydrometallurgy*, 2005, 78(3/4): 264-270.
- [17] WHITTINGTON B I, JOHNSON J A. Pressure acid leaching of arid-region nickel laterite ore. Part III: Effect of process water on nickel losses in the residue[J]. *Hydrometallurgy*, 2005, 78(3/4): 256-263.
- [18] 皮关华, 孔凡祥, 贾露萍, 等. 瑞木红土镍矿高压酸浸的生产实践[J]. *中国有色冶金*, 2015(6): 11-14.
- PI G H, KONG F X, JIA L P, et al. Practice of the HPAL Ramu laterite nickel[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2015(6): 11-14.
- [19] 党晓娥, 谭金滔, 卢苏君, 等. 低品位褐铁矿型红土镍矿资源化利用与新技术研发现状[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2022(4): 12-20.
- DANG X E, TAN J T, LU S J, et al. Resource utilization and new technology development of low grade limonite laterite nickel ore[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2022(4): 12-20.
- [20] 李丹. 褐铁矿型红土镍矿硫酸高压浸出的研究[J]. *矿冶*, 2015, 24(6): 66-71.
- LI D. The study on high pressure sulfuric acid leaching of limonitic laterite ore[J]. *Mining and Metallurgy*, 2015, 24(6): 66-71.
- [21] 李建华, 程威, 肖志海. 红土镍矿处理工艺综述[J]. *湿法冶金*, 2004, 23(4): 191-194.
- LI J H, CHENG W, XIAO Z H. Review on process technologies of laterite-nickel ore[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2004, 23(4): 191-194.
- [22] 蒋继波, 王吉坤. 红土镍矿湿法冶金工艺研究进展[J]. *湿法冶金*, 2009, 28(1): 3-11.
- JIANG J B, WANG J K. Review on progresses for hydrometallurgy of laterite-nickel ore[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2009, 28(1): 3-11.

- [23] 苏平. 西澳大利亚三个镍红土矿项目的工程化比较[J]. 中国有色冶金, 2010(2): 1-8.
SU P. An engineering comparison of three treatment flowsheets in WA nickel laterite projects[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2010(2): 1-8.
- [24] 刘诚, 李少龙, 皮关华. 瑞木红土镍矿高压酸浸湿法工艺生产介绍[J]. 世界有色金属, 2014(10): 25-27.
LIU C, LI S L, PI G H. Introduction to the production process of high-pressure acid leaching wet method for Ruimu laterite nickel ore[J]. World Nonferrous Metals, 2014(10): 25-27.
- [25] 贾露萍, 吴迪, 刘楠才, 等. 红土镍矿高压酸浸小型试验与研究[J]. 有色设备, 2022, 36(1): 18-21.
JIA L P, WU D, LIU N C, et al. Bench-scale HPAL test and research on nickel laterite ore[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2022, 36(1): 18-21.
- [26] CRUNDWELL F, MOATS M, RAMACHANDRAN V. Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum group metals[M]. Elsevier, 2011.
- [27] LIU K, CHEN Q, HU H, et al. Pressure acid leaching of a Chinese laterite ore containing mainly maghemite and magnetite[J]. Hydrometallurgy, 2010, 104(1): 32-38.
- [28] 刘苏宁, 丁剑, 李诺, 等. 红土镍矿湿法冶炼石灰乳沉淀镍钴工艺[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(4): 49-52.
LIU S N, DING J, LI N, et al. Study on precipitation of nickel and cobalt by calcium hydroxide in laterite nickel ore hydrometallurgy[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(4): 49-52.
- [29] HARVEY R, HANNAH R, VAUGHAN J. Selective precipitation of mixed nickel-cobalt hydroxide[J]. Hydrometallurgy, 2011, 105(3/4): 222-228.
- [30] 孙宁磊, 李少龙, 王魁琰, 等. 红土镍矿湿法冶金镍钴沉淀新工艺[J]. 中国有色冶金, 2017, 46(2): 26-28.
SUN N L, LI S L, WANG K T, et al. A new Ni & Co precipitation process in nickel laterite hydrometallurgy[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2017, 46(2): 26-28.
- [31] 蒋开喜, 王海北, 刘三平, 等. 一种红土镍矿两段加压提取镍钴的系统及工艺: CN202111111466.5[P]. 2022-02-01.
JIANG K X, WANG H B, LIU S P, et al. A system and process for extracting nickel and cobalt from nickel laterite ore by two-stage pressurisation: CN202111111466.5[P]. 2022-02-01.
- [32] 董再蒸, 温国栋, 袁帅, 等. 红土镍矿酸浸渣综合利用进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(5): 14-23.
DONG Z Z, WEN G D, YUAN S, et al. Progress in comprehensive utilization of acid leaching residue of laterite nickel ore[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2024(5): 14-23.
- [33] TEITLER Y, CATHELINEAU M, ULRICH M, et al. Petrology and geochemistry of scandium in New Caledonian Ni-Co laterites[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2019, 196: 131-155.
- [34] JIAN P A N, ZHENG G, ZHU D, et al. Utilization of nickel slag using selective reduction followed by magnetic separation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(11): 3421-3427.
- [35] 马泳波, 杜雪岩, 申莹莹, 等. 富铁镍渣综合利用的研究与进展综述[J]. 矿产综合利用, 2018(6): 25-31.
MA Y B, DU X Y, SHEN Y Y, et al. Research and progress of nickel slag's comprehensive utilization[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(6): 25-31.
- [36] LEI M, MA B, CHEN Y, et al. Effective separation and beneficiation of iron and chromium from laterite sulfuric acid leach residue[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(9): 3959-3968.
- [37] WU J Y, MA B Z, CHEN Y Q, et al. Sulfur removal and iron recovery from high-pressure acid leaching residue of nickel laterite ore[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2024: 1-12.
- [38] 郭亚光, 朱荣, 王云, 等. 镍渣煤基熔还原提铁工艺基础研究[J]. 工业加热, 2015(6): 40-43.
GUO Y G, ZHU R, WANG Y, et al. The fundamental research to extract iron from the nickel slag by smelting reduction process[J]. Industrial Heating, 2015(6): 40-43.
- [39] TANG Q, WU K, GAN M, et al. Developing laterite nickel ore leaching residue as sustainable blast furnace charge[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29(11): 1760-1770.
- [40] CAO Z, MA B, WANG C, et al. Thermodynamic analysis and application for preparing FePO₄ from nitric acid pressure leach laterite residue by selective leaching in phosphoric acid and induced precipitation[J]. Hydrometallurgy, 2022, 212: 105896.
- [41] QIAO Y, WANG H, LIU C, et al. Recovery of high-quality iron phosphate from acid-leaching tailings of laterite nickel ore[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 353: 128634.